

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ, ЭКОЛОГИЯ ЖИВЫХ СИСТЕМ И РАЦИОНАЛЬНОЕ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

ПУТИ РАЗВИТИЯ НЕКОТОРЫХ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО ЛАЗЕРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

**ПРИВАЛОВ ВАДИМ ЕВГЕНЬЕВИЧ,
ФОТИАДИ АЛЕКСАНДР ЭПАМИНОНДОВИЧ,
ШЕМАНИН ВАЛЕРИЙ ГЕННАДЬЕВИЧ**

АННОТАЦИЯ

Рассмотрены методы совершенствования лазерных систем дистанционного зондирования окружающей среды. Подготавливается почва для превращения лидара из аналогового прибора в цифровой.

Ключевые слова: лазер; длина волны излучения; лазерный мониторинг; экологическая безопасность; лидар.

REMOTE LASER SENSING MODERN TRANDS

**PRIVALOV V. E.,
FOTIADI A. E.,
SHEMANIN V. G.**

ABSTRACT

The methods of improving the laser remote sensing of the environment. Paves the way for the conversion of lidar analog device in a digital.

Keywords: laser; laser wavelength; the laser monitoring; environmental safety; lidar.

Начало оптическому зондированию атмосферы положил В. В. Кузнецов [1], который измерил в 1905 году высоту облаков с помощью прожектора. В дальнейшем прожектор сменили радиолокатор и лазерный локатор. Кроме расстояния до облаков начали определять состав атмосферы, включая примеси. Лазерные локаторы для определения примесей в атмосфере стали называть лидарами. Техника совершенствовалась [2-5]. Рассмотрим некоторые достижения.

Появился мобильный лидарный комплекс для дистанционного контроля атмосферы [6]. Комплекс содержит платформу, и, установленные на нее, твердотельный лазер, два ТЕА СО₂ лазера, телескоп, двухкоординатный зеркальный сканер, оптические системы передачи излучения, приемную спектральную систему; систему синхронизации, блок сопряжения, включающий: блок управления приводами и блок сбора информации от датчиков, вычислительно-управляющий комплекс, предлагается твердотельный лазер выполнить двухканальным перестраиваемым на Ti: Sapphire с блоками Nd излучателей; каждый ТЕА СО₂ лазер снабдить парой

идентичных, оптически соединенных между собой СО₂ лазеров (гетеродинным и инжекционным), выходом соединенным со входом ТЕА СО₂ лазера, совместно образующие двухканальный гетеродинный лидар, при этом оптическая система передачи излучения каждого канала двухканального гетеродинного лидара состоит из: соединенной с выходом ТЕА СО₂ лазера, первой части оптического тракта, соединенного с оптическим ключом-модулятором, второй части оптического тракта, нижней части телескопического расширителя пучка излучения, половины объектива телескопа и сканера.

Видно, что комплекс обладает большими возможностями, но довольно громоздок. В некоторых случаях часть задач можно выполнить более простым устройством, которое предложено в другом патенте [7].

Здесь упрощение конструкции лидарной системы контроля качества атмосферного воздуха осуществлено за счет использования принципа комбинационного рассеяния света, что позволяет использовать только один лазер для определения степени загрязнения атмосферного воздуха моле-

кулами предельных углеводородов в атмосфере над промышленной зоной. Лидарная система контроля качества атмосферного воздуха построена на принципе комбинационного рассеяния света. Лидарная система состоит из платформы с установленными на ней твердотельным лазерным излучателем на алюмоиттриевом гранате с неодимом, работающий в режиме третьей гармоники на длине волны 355 нм, оптической системы передачи лазерного излучения, приемного телескопа, блока сбора информации и вычислительно-управляющего комплекса.

Оптическая система передачи лазерного излучения дополнительно содержит преломляющую призму, направляющую лазерное излучение в исследуемую область пространства. Приемный телескоп выполнен в виде телескопа типа Ньютона со сферическим зеркалом и линзовым объективом, а блок сбора информации содержит интерференционный светофильтр для выделения участка спектра комбинационного рассеяния света исследуемыми молекулами с линиями молекул углеводородов, фотоэлектрический умножитель, масштабный усилитель, аналого-цифровой преобразователь и плату сбора данных.

Так как над промышленным предприятием основными загрязняющими веществами являются молекулы предельных углеводородов, то нецелесообразно использовать сложное оборудование для многокомпонентного анализа воздушного пространства над исследуемой областью, а достаточно использовать простую в исполнении лидарную систему для определения степени загрязнения атмосферного воздуха только молекулами предельных углеводородов.

На рис. 1 представлена оптическая схема лидарной системы контроля качества атмосферного воздуха. Лидарная система включает в себя приемный телескоп типа Ньютона со сферическим зеркалом 1 диаметром 0,4 м, линзовый объектив 2, интерференционный светофильтр 3 с максимумом пропускания на длине волны комбинационного рассеяния света, фотоэлектрический умножитель 4, преломляющая лазерное излучение призма 5, 6 – твердотель-

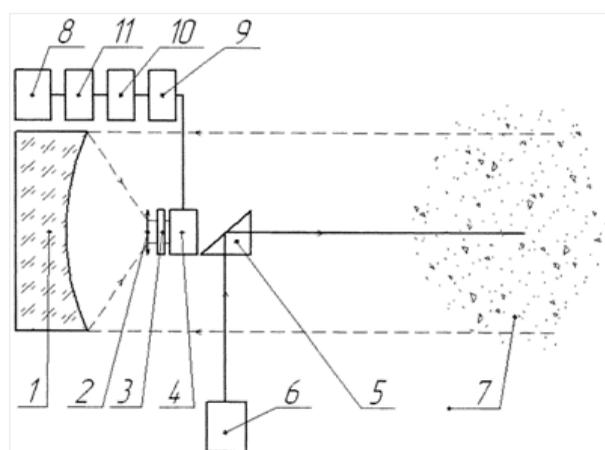


Рисунок 1 – Лидарная система контроля качества атмосферного воздуха

ный лазер на алюмоиттриевом гранате с неодимом, 7 – контролируемая область пространства, 8 – вычислительно-управляющий комплекс, 9 – масштабный усилитель, 10 – аналого-цифровой преобразователь, 11 – плата сбора данных.

Принцип лазерного дистанционного зондирования методом комбинационного рассеяния света заключается в регистрации лазерного излучения, комбинационно рассеянного молекулами предельных углеводородов в направлении 180° с частотным сдвигом, характерным именно для этих молекул и определяемым их колебательными полосами.

Система работает следующим образом: импульс твердотельного лазерного излучателя 6 на алюмоиттриевом гранате с неодимом, работающий в режиме третьей гармоники на длине волны 355 нм, направляется в исследуемую область пространства 7 над промышленной зоной. Часть лазерного излучения используется для создания опорного сигнала, который задает начало отсчета времени, а его амплитуда – энергию лазерного импульса. Рассеянное назад излучение комбинационного рассеяния света исследуемыми молекулами собирается телескопом типа Ньютона 1, фокусируется через линзовый объектив 2, проходя сквозь интерференционный светофильтр 3 на фотокатод фотоумножителя 4. Импульс напряжения с ФЭУ подается на вход масштабного усилителя 9, затем при помощи аналого-цифрового преобразователя 10 через плату сбора данных 11, сигнал поступает на вычислительно-управляющий комплекс, где информация обрабатывается стандартным программным обеспечением и формируется сигнал для передачи его по каналам связи (Internet, wi-fi и т.д.).

Для сопоставления достоверности измерений в нашей ситуации, были рассчитаны и даны оценки мощности регистрируемого излучения комбинационного рассеяния света молекулами предельных углеводородов по лидарному уравнению для комбинационного рассеяния света исследуемыми молекулами.

Полученные результаты подтверждают, что для заданной концентрации зондируемых атомов N_a и энергии комбинационного рассеяния, равной энергии 10 фотонов, оптимальным вариантом для обнаружения предельных углеводородов на расстояниях до 6 км является длина волны лазерного излучения: $\lambda_L = 355$ нм, которая при энергии импульса лазера 1 мДж позволяет проводить измерения в минимально возможное время.

По всей трассе зондирования с увеличением расстояния от 0,01 до 2 км время измерения увеличивается примерно на 4 порядка. Если за установленное время с расстояния $R=2,0$ км, при заданном числе импульсов, посылаемых в атмосферу, ФЭУ регистрирует больше, чем 10 фотонов, мы можем сказать о превышении на этом расстоянии концентрации молекул над заданным уровнем. Кроме того, полученные значения времени измерения удовлетворяют требованию по быстродействию лидара.

Метод обеспечивает высокую точность измерений в средах, где в качестве источников загрязнений выступают молекулы предельных углеводородов.

Лидар в режиме секторного обзора, который обеспечивается за счет поворота платформы, устанавливаются в промышленной зоне на доминирующее по высоте строение. Лидарная система контроля качества атмосферного воздуха предназначена для непрерывного контроля содержания газообразных предельных углеводородов в исследуемой области пространства. В случае обнаружения аварийного выброса или превышения уровня предельно-допустимых концентраций, в режиме реального времени происходит обработка результатов в вычислительно-управляющем комплексе и передача сигнала по каналам связи.

Лидарная система контроля качества атмосферного воздуха позволяет проводить дистанционный мониторинг загрязнения воздуха путем измерения энергии импульса, отраженного от загрязнений (мишени). Однако, при малых загрязнениях и больших расстояниях до мишени энергия импульса уменьшается в $10^3 - 10^9$ раз, становясь соизмеримой с шумами электронных приборов. В результате полезный сигнал может быть неразличим в этих шумах. Таким образом, недостатком лидарной системы контроля качества атмосферного воздуха является низкая чувствительность к малым загрязнениям, которая падает с ростом расстояния до мишени.

Указанный недостаток исправляет другое предложение [8]. Сущность предлагаемого решения иллюстрируется рис. 2, на котором изображена функциональная схема системы, где 1 – приёмный телескоп со сферическим зеркалом, 2 – линзовый объектив с интерференционным светофильтром, 3 – фотоприёмник, 4 – лазер, 5 – поворотная призма для направления лазерного излучения, 6 – контролируемая область пространства с загрязнениями (мишень), 7 – отражатель рассеянного излучения, 8 – блок сбора и обработки информации.

Лидарная система контроля загрязнения воздуха работает следующим образом. Импульс лазерного излучения из лазера 4 поворотной призмой 5 направ-

ляется в сторону мишени 6. Основная часть излучения достигает мишени 6 и рассеивается ею, формируя информацию об уровне загрязнения. Очень малая часть рассеянного излучения направляется назад в приёмный телескоп 1. Более значительная часть рассеянного излучения достигает отражателя 7 и направляется им в приёмный телескоп 1. Оба указанных потока излучения собираются линзовым объективом 2 с интерференционным светофильтром и направляются в фотоприёмник 3, формирующий электрический импульс. Последний поступает в блок 8 сбора и обработки информации, где вырабатывается сигнал об уровне загрязнения.

Определение уровня загрязнения воздуха происходит более точно, поскольку итоговый сигнал формируется двумя потоками излучения, вместо одного, как было у авторов [7]. Поток от отражателя 7 на порядок и более превышает рассеянное назад мишенью 6 излучение. Поэтому чувствительность предлагаемой системы заметно превышает чувствительность прототипа.

В частном случае реализации, если контролируемой областью пространства с загрязнениями является промышленный объект (атомная станция, нефтеперерабатывающий или цементный заводы и т.п. производства), то отражатель 7 устанавливают непосредственно на этом объекте, например, на вентиляционной трубе. Тогда выходящий из трубы поток является мишенью 6. При направлении импульса лазерного излучения на срез трубы обратно рассеивается загрязнением весьма малая часть излучения. Если отражатель 7 устанавливают на пути рассеянного загрязнением лазерного излучения так, чтобы большая часть отражённого излучения направлялась в приёмный телескоп 1, то достигающий приёмного телескопа 1 рассеянный поток лазерного излучения многократно возрастает, обеспечивая более высокую чувствительность лидарной системы. Можно предложить другой случай реализации предлагаемого технического решения. Отражатель 7 устанавливают на летательном аппарате (включая беспилотный). Последний зависает над наиболее опасной зоной контролируемого пространства, поворотная призма 5 направляет излучение лазера 4 на отражатель 7, а последний направляет значительную часть рассеянного лазерного излучения в приёмный телескоп 1, обеспечивая более высокую чувствительность лидарной системы. Чем больше площадь отражателя 7, тем больше поток рассеянного лазерного излучения, направленного в приёмный телескоп 1. Рост площади отражателя 7 в приведенных примерах ограничивается прочностью соединения отражателя 7 с вентиляционной трубой или подъёмной силой летательного аппарата, а также возможностью сохранять способность к направлению излучения в приёмный телескоп 1 при порывах ветра и других атмосферных явлениях. Оптимальная форма отражателя 7 – параболоид, в фокусе которого находится мишень 6. Допустимы в отдельных случаях – плоский отражатель, уголко-

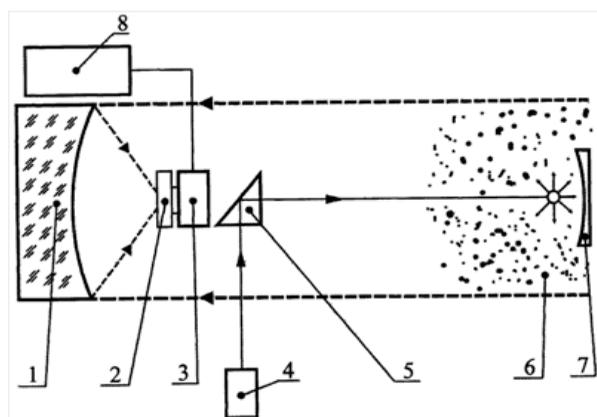


Рисунок 2 – Лидарная система контроля загрязнения воздуха

вый отражатель. Отражатель 7 может быть снабжен селективными отражающими покрытиями для соответствующих длин волн рассеянного излучения.

Эффективность предлагаемой модели можно продемонстрировать на следующем примере. Источником излучения служит лазер на алюмоиттриевом гранате с неодимом со средней мощностью излучения второй гармоники излучения (длина волны 0,532 мкм) 1 Вт. Мишенью являются пары йода-131 над радиоактивным объектом. Объект отстоит на 1 км от лидарной системы. Мощность излучения, рассеянного обратно в приёмный телескоп без отражателя обычно составляет 1-10 мкВт и менее. При установке отражателя диаметром 0,5 м у среза вентиляционной трубы, мощность вернувшегося рассеянного излучения увеличивается на несколько порядков и достигает 1-10 мВт в зависимости от погодных условий и расстояния от излучающего лазера, что позволяет определить степень повышения загрязнений от ПДК с повышенной чувствительностью.

Рассмотрим ещё одно техническое решение, задачей которого является разработка измерителя уровня радиации [9] с повышенной чувствительностью для дистанционного мониторинга радиоактивного загрязнения радиационно-опасных предприятий за счет измерения спектра частот импульса, отражённого от мишени.

Сущность предлагаемого решения иллюстрируется рис. 3, на которой изображена функциональная схема измерителя, где 1 – лазер, 2- поворотное устройство, 3 – светоделитель, 4 – фотодиод, 5 – фотоумножитель, 6 – сферическое зеркало, 7 – линза, 8 – усилитель электрических импульсов, 9 – осциллограф, 10 – блок ФСИС (формирования спектра импульсов света), 11- ЭВМ.

Измеритель уровня радиации работает следующим образом. Импульс лазерного излучения из лазера 1 поворотным устройством 2 направляется в сторону мишени. Малая часть излучения по пути к мишени светоделителем-3 отводится на фотодиод 4, формирующий электрический синхронизирующий импульс, поступающий на вход осцил-

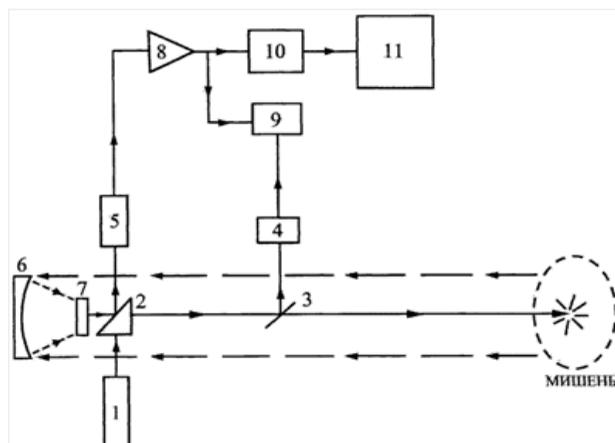


Рисунок 3 – Измеритель уровня радиации

ллографа 9. Основная часть излучения достигает мишени и рассеивается ею, формируя информацию об уровне радиации. Рассеянное излучение достигает сферического зеркала 6, отражается и собирается линзой 7 через отражающую поверхность поворотного устройства 2 в фотоумножителе 5, формирующем электрический импульс, усиливаемый усилителем 8. Сигнал с последнего поступает на два параллельных входа: блока ФСИС 10 и осциллографа 9. Сигнал с усилителя 8 в осциллографе 9 преобразуется в сигнал дальности до мишени. Блок 10 ФСИС выделяет спектр частот электрического импульса и подаёт его на вход ЭВМ 11 для определения уровня радиации по параметрам спектра. Например, в качестве блока ФСИС могут быть использованы промышленные анализаторы спектра С4 – 25 или С4 – 8.

Измеритель уровня радиации позволяет выявлять даже малые загрязнения над радиационно-опасными предприятиями на большом от них расстоянии путем измерений спектра частот импульса, отраженного от мишени, а не по энергии импульса. Известно, что энергия импульса на эталонном уровне измеряется сегодня с погрешностью в четвертом знаке, а частота – в четырнадцатом знаке. Следовательно, учет спектра частот импульса повышает чувствительность измерителя уровня радиации на несколько порядков.

Определение уровня радиации по параметрам спектра можно осуществлять, например, следующим образом. Опытным путём градуируют измеритель уровня радиации по сигналу, отражённому от источника, уровень радиации которого хорошо известен. Например, в зависимости от расстояния до источника, либо в зависимости от уровня радиации по источнику с переменным уровнем радиации. Градуировка осуществляется по изменению спектра частот импульса, а частота в настоящее время измеряется на десять порядков точнее, чем энергия импульса. Имея градуировочную кривую, определяют уровень радиации неизвестной мишени при достаточно малых амплитудах рассеянного назад сигнала.

В результате применения предлагаемого измерителя уровня радиации появляется возможность дистанционного мониторинга удаленных радиационно-опасных объектов при малых уровнях радиации.

Таким образом, приведенные результаты позволяют рассчитывать на дальнейший прогресс в области экологического приборостроения.

Список литературы

1. Прожекторный луч в атмосфере (ред. Г. В. Розенберг) – М.: АН ССР, 1960. – 244 с.
2. Зуев В. Е., Кауль Б. В., Самохвалов И. В., Кирков К. И., Цанев В. И. Лазерное зондирование промышленных аэрозолей. – Новосибирск: Наука. 1986. – 186 с.

3. *Межерис Р.* Лазерное дистанционное зондирование. – М.: Мир, 1987. – 550 с.
4. *Привалов В. Е., Фотиади А. Э., Шеманин В. Г.* Лазеры и радиационная безопасность // Национальная безопасность и стратегическое планирование. – 2013. – № 1. – с. 69-74.
5. *Привалов В. Е., Фотиади А. Э., Шеманин В. Г.* Дистанционное лазерное зондирование и экологическая безопасность // Национальная безопасность и стратегическое планирование. – 2013. – № 2. – с. 72-82.
6. *Борейшо А. С., Мошков В. Л., Тарасова Т. Е. и др.* Мобильный лидарный комплекс для дистанционного контроля состояния атмосферы. Патент РФ № 43657
7. *Аблязов Э. К., Шеманин В. Г.* Лидарная система контроля качества атмосферного воздуха. Патент РФ № 101836
8. *Привалов В. Е.* Лидарная система контроля загрязнений воздуха. Патент РФ № 113846
9. *Привалов В. Е.* Измеритель уровня радиации. Патент РФ № 110549